快中子照相分辨率的影响因素与研究进展

许鹏[1]，俞汪涛[1]，鲍杰[2]，侯林军[1]，周满[1]

(1. 火箭军工程大学核工程学院，西安 710025；
2. 中国原子能科学研究院核物理研究所，北京 102413)

摘要：快中子照相技术在无损检测领域具有独特的应用潜力，能够识别检测大尺寸样品内部的缺陷，有效补充了传统低能中子照相和 X 射线照相技术的局限性。然而，快中子照相分辨率不高的问题限制了其在高精度检测中的应用。本工作简单介绍了快中子照相的基本原理和系统组成，深入分析了影响快中子照相分辨率的多重因素，分别从系统组成和成像过程两个维度出发，系统地评述了目前国内外学者开展的相关研究工作，最后基于现有的研究基础，为提高快中子照相分辨率提供了一些研究方向和思路。

关键词：无损检测；快中子照相；分辨率；系统组成；成像过程

中图分类号： TL99　　**文献标志码：** A　　**DOI:**

0 引言

随着现代工业技术的不断发展，无损检测技术在材料质量和结构安全检测方面扮演着越来越重要的角色。中子照相技术因其独特的穿透能力和对特定材料的敏感性，已经成为一种不可或缺的检测手段。尤其是快中子照相技术，它利用高能中子与物质相互作用的特性，能够有效地检测大尺寸或高密度样品内部的缺陷和结构，在货物检查[1]、材料缺陷检测[2,3]和武器质量检测[4]等领域展现出广泛的应用潜力。

然而，快中子照相技术在实际应用中面临着分辨率不高的挑战，这限制了其在高精度检测任务中的应用。分辨率的高低直接关系到成像系统识别细小缺陷和细节的能力，提高分辨率不仅能够提升检测的准确性，还能拓宽快中子照相技术的应用范围，如在微小缺陷检测和材料内部结构分析等领域。因此，提高快中子照相的分辨率对于推动其在高分辨率检测领域的应用具有重要意义。

本文深入分析了影响快中子照相分辨率的各种因素，并且基于现有提高快中子照相分辨率的研究工作，全面综述了当前的解决方法和最新的研究进展。如图 1 所示，本文首先介绍了快中子照相技术的基本原理和系统组成，然后分别从照相系统和成像过程两个维度展开分析。一是从照相系统的组成出发，综合考量了中子源、准直器和探测器等关键部件对分辨率的影响，并探讨了通过系统优化提升分辨率的可行性；二是从成像的物理过程出发，深入分析了中子散射、粒子串扰和噪声污染等物理现象对分辨率的影响，并

收稿日期： 2024-12-03；　**修改日期：** 2025-01-17

作者简介： 许鹏(1976—)，男，湖北宜昌人，教授，博士生导师，从事核技术及应用研究； E-mail: xupeng76345@163.com

分析了实验方法和数值算法改善成像质量的效果。最后，本文提出了一些建议的研究方向，为未来提高快中子照相分辨率的研究提供了新的思路。

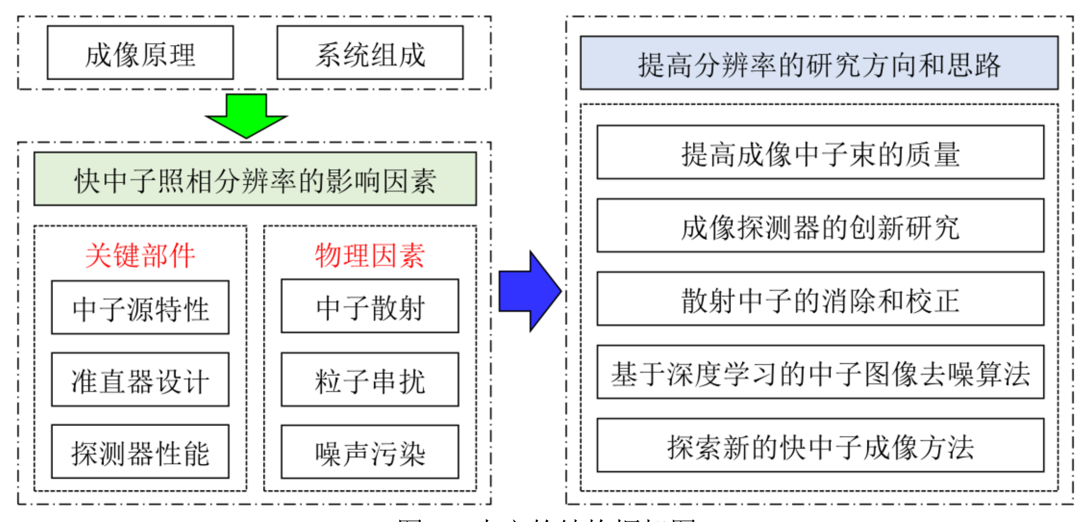


图 1　本文的结构框架图

1　成像原理与系统组成

快中子照相的成像原理是基于中子与物质相互作用时的衰减特性来揭示物体内部的结构信息。如图 2 所示，当入射中子穿过样品时，它们可能直接穿透样品或者发生散射、吸收反应。由于不同材料对中子的散射和吸收能力存在差异，导致中子强度在穿透样品后出现不同程度的衰减。通过测量这些中子的强度衰减变化，可以逆向重建出样品的内部结构。中子强度的衰减规律可以用以下公式描述[5]：

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu t} \tag{1}$$

其中，I 和 I_0 分别为穿透样品前后的中子强度，μ 为衰减系数，t 为样品厚度。

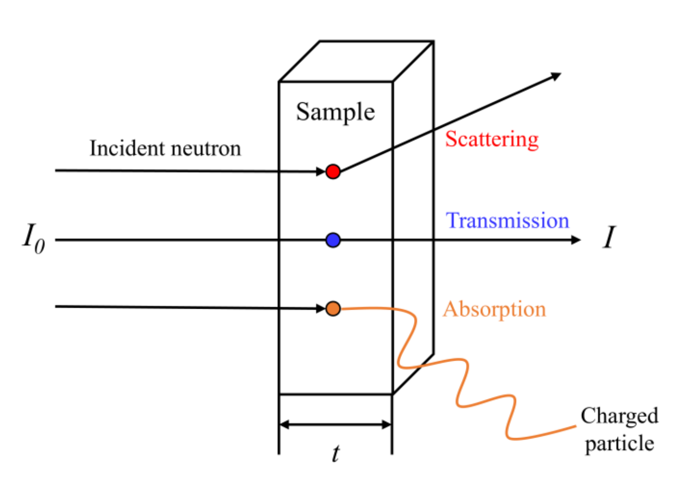


图 2　中子与物质的相互作用

典型的快中子照相系统主要包括中子源、准直器、样品和像探测器四个部分，如图 3 所示。中子源提供成像的快中子束，利用准直器限制中子束的传播方向，进而照射到待测样品上，探测器负责捕捉穿过样品后的中子并将其转换为可见光子信号，最后获得可视化的图像。

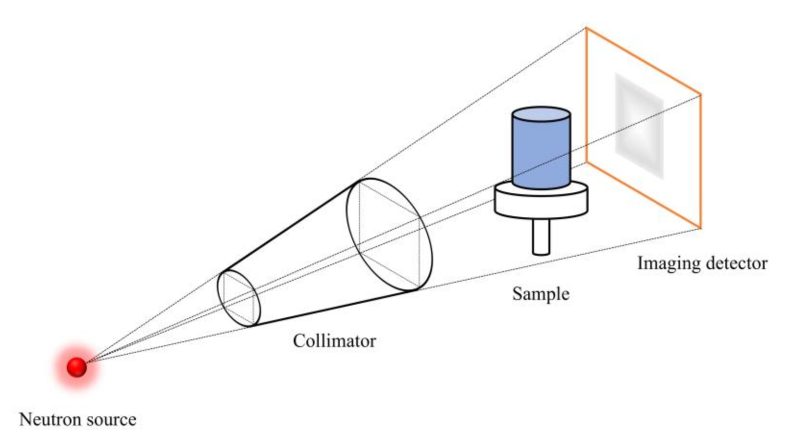


图 3　典型的快中子照相系统示意图

2　关键部件的影响及发展

2.1　中子源特性

中子源是快中子照相系统的核心组成部分，用于提供成像的中子束。常用于中子照相的中子源主要有反应堆中子源、加速器中子源、散裂中子源和同位素中子源，表 1 对比了这几种典型中子源的特性。

表 1　典型中子源的特性对比

特性	中子源类型					
	反应堆中子源	加速器中子源	散裂中子源	同位素中子源		
中子产生方式	原子核裂变	$^{2}H(d, n)^{3}He$ $^{3}H(d, n)^{4}He$ $^{7}Li(d, n)^{8}Be$ $^{9}Be(d, n)^{10}B$	高能质子束轰击重核	(α, n)	(γ, n)	自发裂变 (^{252}Cf)
反应方式	连续	连续/脉冲	脉冲	连续	连续	连续
中子能谱	较宽	窄	宽	较宽	窄	较宽
中子产额(n/s)	10^{14}~10^{16}	10^{8}~10^{13}	10^{14}~10^{16}	10^{7}~10^{10}/g	~10^{9}/g	~10^{12}/g
本底水平	高	低	低	高	高	高

中子源作为快中子照相系统的辐射源，其特性对成像分辨率具有决定性影响，主要体现在以下几个方面：

1）中子源的能谱分布决定了中子与物质相互作用的类型和概率，宽谱中子源可能导致多种相互作用并存，增加了散射和衰减的不确定性，从而降低成像分辨率，而单色中子源能够更好地突出不同材料之间的对比度，并且减少了由于能量分布不均而产生的背景噪声。

2）中子源的尺寸和几何形状影响中子束流的空间分布，即发散度和均匀性。源尺寸越小，越接近点状，中子束的发散度越小、均匀性越好，成像的空间分辨率越高。

3）中子源的强度直接影响信噪比和曝光时间，高强度的束流可以缩短曝光时间，减少统计噪声，提高成像效率和信噪比，但当束流强度过高时，可能会导致探测器饱和，信号过载，产生额外的噪声，从而降低空间分辨率。

4）中子源的辐射特性对成像分辨率也有一定影响，如果中子源伴随较强的伽马射线等辐射背景，可能会干扰成像信号，降低分辨率和成像质量。

综上所述，中子源的选择对于实现高分辨率的快中子照相至关重要，需要综合考虑能谱分布、尺寸形状、束流强度和辐射特性等，同时平衡好系统的成像效率与空间分辨率的关系。表 2 总结了部分国内外的研究机构用于快中子照相实验研究的中子源，其中加速器中子源已经成为开展快中子照相实验研究的主要选择，因为加速器中子源的中子靶点小，中子产额较高，能量单一，伴随 γ 射线强度较低，同时其小型化和便携性也使其在快中子照相中具有广泛的应用潜力。

表 2　国内外快中子照相实验研究的中子源概况

研究机构	中子源	中子通量 (n/cm^2·s)	中子产额 (n/s)	中子能量 (MeV)
日本东京大学	YAYOI 反应堆[6]	10^6-10^7(束孔出口)	/	＞1.3
瑞士 PSI 研究所	D-T 中子发生器[7]	/	~2×10^{10}	14
LLNL	D-D 加速器[8]	/	~10^{11}	10
阿德尔菲科技有限公司	DD-109 中子发生器[9]	/	~10^9	2.5
	DT 中子发生器[10]	/	3×10^9	14.1
瑞典乌普萨拉大学	FANTOM 系统[11]	/	~10^8	14
南非核能公司	RFQ 加速器[12]	~10^4(4 米外)	/	4-5
布达佩斯中子中心	10MW 研究反应堆[13]	2.7×10^7(束孔出口)	/	＞2.5
印度 BARC 研究中心	D-T 中子发生器[14]	/	2×10^9	14
韩国 KSTAR 研究中心	D-D 聚变中子源[15]	/	~10^{14}	2.45
北京大学	4.5MV 静电加速器[16]	/	~10^{10}	3.5-6.5
中国科学技术大学	^{241}Am-Be 同位素中子源[17]	/	~10^5	4
	D-T 中子发生器[17]	/	~10^9	14
	HINEG [18-20]	/	6.4×10^{12}	14.1
中国工程物理研究院	K400 中子发生器[21]	/	3×10^{10}	14
	D-T 加速器[22,23]	/	4.3×10^{10}~6.8×10^{10}	14
	紧凑型 D-T 加速器[24]	/	1.7×10^{11}	14
	激光驱动 D-T 中子源[25]	/	~10^{12}	14
中国原子能科学研究院	600kV 高压倍加器[26-28]	/	~10^{11}	14.1

如图 4 所示，600kV 高压倍加器的中子源主要包括离子源、加速管道、偏转磁铁、束流管道和靶片，利用 600kV 加速器加速离子流，轰击靶片的活性区，由 T(d, n)He 反应产生能量为 14.1MeV 的快中子。基于此我们开展了快中子照相的模拟研究和实验研究[4,27,28,96]，建立了快中子照相的探测指标，探索了快中子照相在武器质量检测中的可行性，这些实验结果都说明了中子源在快中子照相系统中的主导地位。

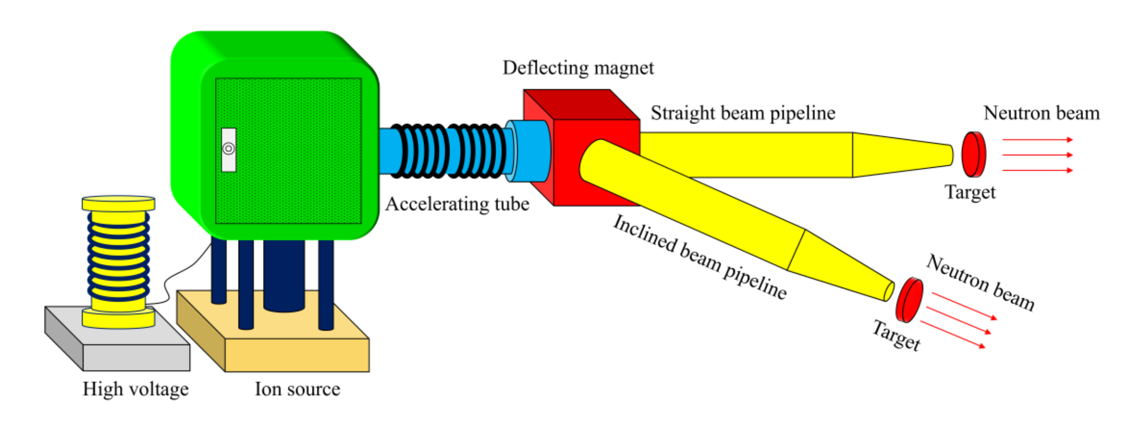


图 4　600kV 高压倍加器的中子源结构示意图

2.2　准直器设计

准直器的作用是限制中子束的出射方向，以减少散射中子和提高成像的几何分辨率。在快中子照相系统中，准直器的设计扮演着举足轻重的角色，需要从准直器的几何形状和材料选择两个方面考虑。

（1）几何形状

准直器的几何形状多种多样，包括发散型、圆管型、多束平板型和多束圆管型等[29]，其中发散型准直器具有较好的准直效果且加工相对简单，因此得到了广泛使用，目前快中子照相系统也多选用这类准直器。如图 3 所示，发散型准直器通常采用锥形结构，其中锥形通孔的直径从准直器的入口至出口逐渐变大。准直器的长度和孔径大小确定准直比 L/D，直接影响系统的几何不锐度，几何不锐度越小，分辨率越高，中子图像的清晰度越好。如图 5 所示，准直器的入口直径为 D，准直器入口距离探测器距离为 L，样品距离探测器为 l，在图像出现的几何不锐度为 U_g，则：

$$U_g = \frac{l}{(L-l)/D} \tag{2}$$

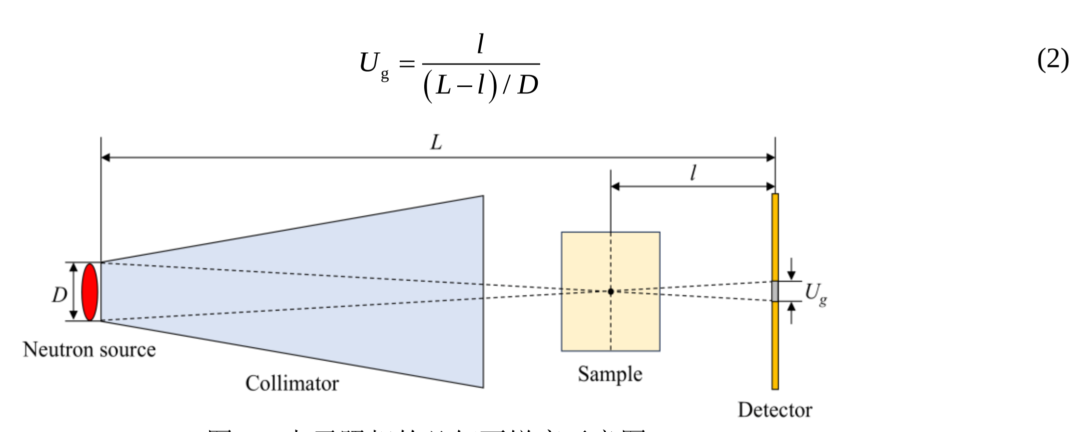


图 5　中子照相的几何不锐度示意图

为了提高快中子照相的分辨率，我们通常会选择长度较长且孔径较小的准直器，保证较高的准直比，来提高中子束的平行度。但是，过度地追求高准直度会大大减少成像处的中子通量，从而降低成像效率。因此，我们需要找到最佳的长度和孔径组合，以在提高空间分辨率的同时，尽量保持足够的中子通量。

（2）材料选择

准直器的材料选择决定着准直和屏蔽效果，达到降低中子束中杂散粒子成分的目的。为了防止杂散中

子到达样品，并减少准直器内的中子发生散射，必须采用中子吸收材料作为准直器的内层材料。2004 年，E.M.A. Hussein 等人研究得出，铁和钨是快中子照相系统的准直器内层材料的最佳选择[30]。但是，中子在内层材料内无法被完全吸收，需要在外层需要添加一层硼或含硼聚乙烯作为慢化材料，用来吸收慢化的中子，防止中子继续穿透。另外，为了滤除中子束中的伽马射线，我们需要使用兼顾有效性和耐用性的铅作为伽马滤除材料[31]。

在快中子照相系统中，我们需要根据系统的实际需求来设计合适的准直器，主要从几何不锐度(U_g)、快中子强度(f_F)、未碰撞中子通量(*UNC*)以及中子伽马比(n/γ)的评价指标来综合评估准直器的性能[32-36]。因此，准直器的优化设计是复杂且实验成本较高的工作，通常是采用 MCNP 或 Geant4 蒙特卡洛软件进行精确计算和模拟，以实现成像效率和空间分辨率的最佳平衡，最终得到准直器的最佳设计方案[36-39]。其中，文献[39]中还提出了一种结合遗传算法和 MCNP 代码的准直器优化设计方法，更好地提高了准直器的性能，这为准直器的研究和优化设计提供了一种思路。

2.3 探测器性能

为了获得高质量的快中子图像，高空间分辨率和探测效率的快中子成像探测器是必不可少的。目前用于快中子照相的探测器主要分为以下四种类型，成像原理图如图 6 所示。

1）聚乙烯转换层＋成像板(IP)的像探测器[40,41]

如图 6(a)所示，聚乙烯转换层将快中子转换成反冲质子，最终在成像板形成潜在的二维图像。

2）闪烁体转换屏＋CCD 相机的像探测器[42,43]

如图 6(b)所示，快中子进入闪烁体转换屏与闪烁体材料（如含氢的化合物）发生相互作用，通常是弹性散射，中子将部分能量转移给闪烁体原子产生反冲质子，这些反冲质子在闪烁体中与荧光物质进一步相互作用，激发出荧光光子，最后光子经过反射镜反射被 CCD 相机捕获并记录成像。

3）富氢材料转换层＋气体电子倍增器(GEM)的像探测器[44-47]

如图 6(c)所示，富氢材料转换层将快中子转换成反冲质子，通常为聚乙烯(PE)或聚丙烯(PP)，反冲质子进入漂移区内，产生电离电子，这些电子随后被收集，并经过多个级联的气体电子倍增器(GEMs)进行倍增，倍增电子最终聚集在阳级，通过后端的信号读出板来确定入射中子的空间位置，进而形成二维图像。

4）聚乙烯转换层＋微通道板(MCP)的像探测器[48-53]

如图 6(d)所示，聚乙烯转换层将快中子转换成反冲质子，这些反冲质子撞击 MCP，释放出二次电子并实现电子倍增，倍增电子最终打在荧光屏(PS)上产生光子，这些光子在反射镜上发生反射后，被 CCD 相机捕获并记录成像。

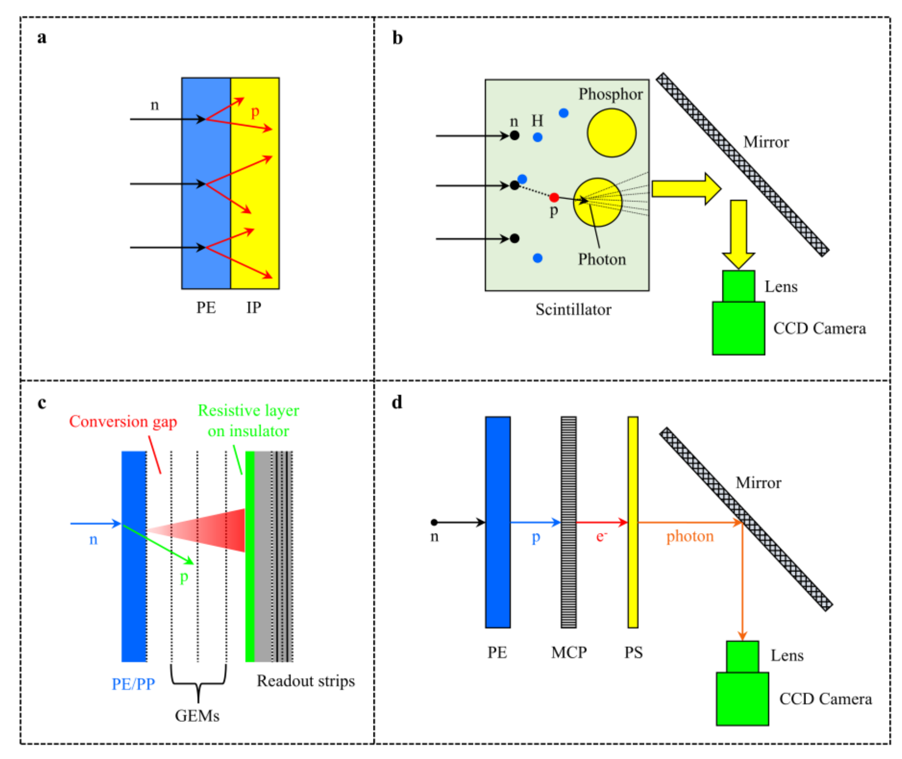


图 6　四种快中子照相探测器的成像原理图

我们对比了四种探测器方案的优缺点，归纳如表 3 所示。在实际的实验中，我们需要根据快中子成像的应用需求和现有的实验条件来选择合适的像探测器类型。快中子成像探测器的探测效率和空间分辨率一般无法兼顾，我们需要平衡两者之间的矛盾点，根据实际需求来选择侧重点。为了提高快中子成像分辨率，近年来国内外研究学者主要是采用闪烁体转换屏＋CCD 相机的像探测器，通过寻找高效的闪烁体材料来提高探测器的空间分辨率，进而来改善快中子照相的分辨率。例如，聚乙烯基甲苯(PVT)[54]、半导体纳米晶体[55]、发光卤化铅离子液体[56]、二维钙钛矿半导体[57-59]、二苯乙烯有机闪烁晶体[60]、新型铋塑料(Ir-Bi-Plastic)闪烁体[61]等等。但是，我们不能一味地追求高分辨率而忽视了探测效率，否则会使成像速度大大降低，甚至导致噪声水平大大升高，降低了信噪比，影响了成像的准确性和可靠性。

表 3　四种探测器方案的优缺点

探测器方案	优点	缺点
聚乙烯转换层＋成像板	结构简单，成本较低，操作简便	响应时间较长，成像速度慢；信号读出过程复杂；动态范围有限，高对比度样品成像效果不佳
闪烁体转换屏＋CCD 相机	成像速度快，实时成像能力强	抗辐射能力有限；光子散射影响分辨率；快中子转换效率和曝光时间限制导致高质量成像困难
富氢材料转换层＋气体电子倍增器	增益高，有较好的位置分辨；能量分辨能力较好	n/γ 甄别差，信号噪声大，影响成像质量；成本较高
聚乙烯转换层＋微通道板	高灵敏度；电子倍增效果佳，有效放大信号；能够快速响应光子；空间分辨率高	MCP 寿命有限，长时间或高辐射环境下易损坏；信号饱和问题，高通量下信号堆积；成本较高

3 物理因素的影响及校正

3.1 中子散射

在成像过程中，快中子的散射特性会干扰透射中子的信号，对图像的分辨率和对比度造成影响。散射中子的来源主要有三种[62,63]：一是从中子源方向发射出来的散射中子；二是从实验室的周围物体发射出来的散射中子；三是来自样品内部的散射中子。前两者可以通过选择合适的准直器材料和构建屏蔽设施来有效降低其带来的影响，然而后者难以被有效控制，这是影响快中子图像质量的主要因素之一。为了降低散射中子对成像质量的影响，目前研究学者们主要从实验方法和模拟方法两个方向去解决。

（1）实验方法

最简单的实验方法是增加样品与探测器之间的距离，减少探测器中的散射中子分量，但这会增加几何不锐度，降低空间分辨率。在热中子照相中，为了滤除散射中子分量，研究学者们提出了一些添加“校正器”类的实验方法[64-67]，但是快中子的散射特性更复杂，几乎没有材料能够实现对快中子强吸收，所以此类方法并不适用于快中子照相。然而，双探测器法[68]和散射侧像法[69]在快中子照相的散射校正中具有一定的研究潜力。如图 7(a)所示，双探测器法将两个探测器放置于远、近两个位置同时成像，获取两个位置的中子图像并进行数据处理来完成散射校正；如图 7(b)所示，散射侧像法将散射的侧像与前向散射分量相关联，最终从测量图像中减去估计的前向散射图像来得到消除散射中子分量的图像。这两种方法有待进一步的模拟分析和实验验证。

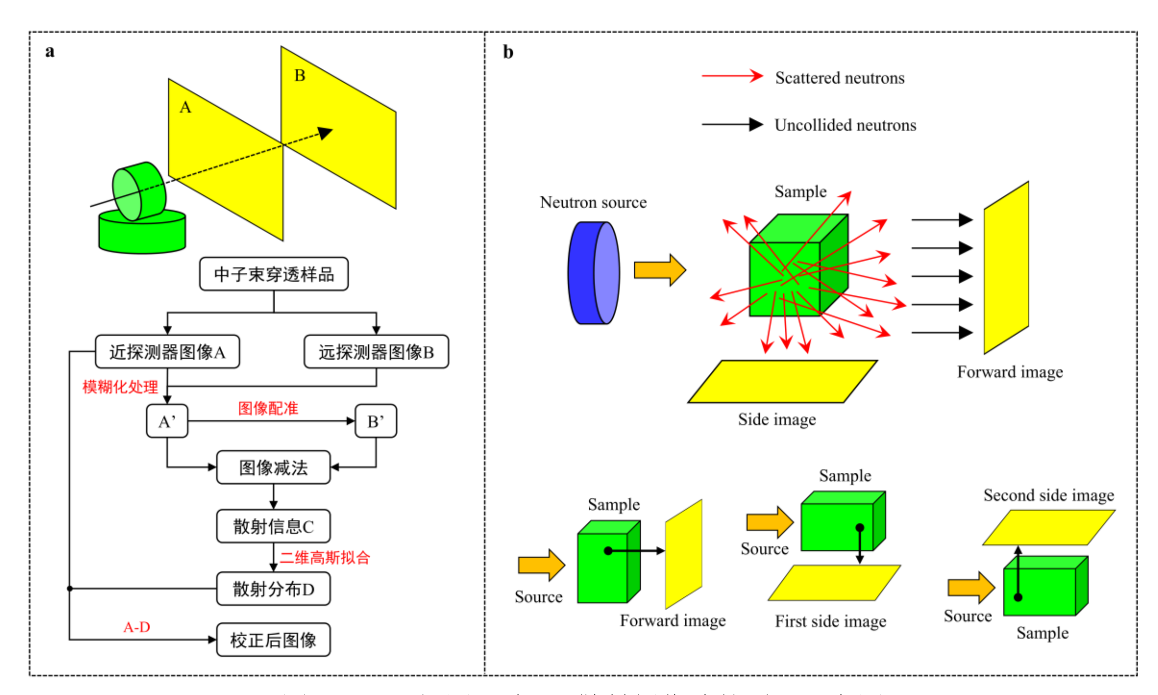


图 7 (a)双探测器法, (b)散射侧像法的原理示意图

（2）模拟方法

为了评估中子照相中的散射中子分量，国内外学者提出了一些基于模拟分析的方法，但这类方法仅限

于特定几何形状的样品[63,70-72]。近年来，点散射函数(Point Scattered Function, PScF)已经成为中子散射校正的有效模拟方法[73-76]。PScF 是中子束穿过待测样品后在距离散射投影点 r 处被探测器探测到的概率密度分布函数，如图 8 所示。如果确定了每个像素对应的 PScF，那么总散射分布可以认为是每个像素特定 PScF 的叠加[73]。PScF 取决于材料组成、能谱、探测器、样品几何和样品到探测器的距离，国内外学者基于这些模型参数利用 MCNP 进行蒙特卡罗模拟得到 PScF，进而开发中子散射校正算法[77-79]。

由于模拟快中子的 PScF 是费时的，并且对 CPU 性能要求很高，倪嘉雨等人[80]通过迭代算法优化提出了一种更简单的实用近似点散射函数，这为快中子散射校正算法提供了新的研究思路。由于基于 PScF 的中子散射校正方法需要事先引入样品的先验信息，并且蒙特卡罗模拟的使用大大增加了后处理的复杂性，导致该方法在实际应用中具有局限性和挑战性。

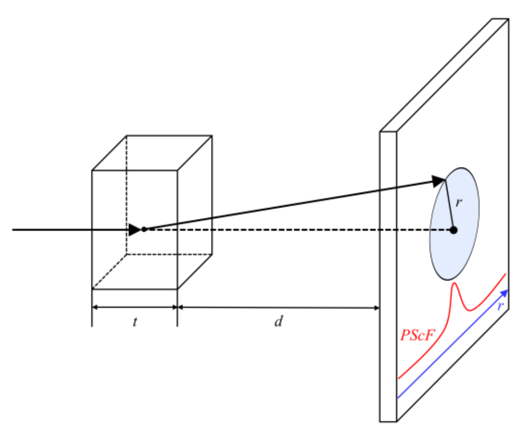


图 8　中子照相的点扩散函数(PScF)示意图

3.2　粒子串扰

快中子成像探测器不可避免地需要考虑粒子串扰的影响，串扰问题会导致系统的分辨率变差。当穿透样品后的中子束进入探测器，发生相互作用后产生反冲质子和散射中子，这些次级粒子可能会运动到其他空间位置上，最终与荧光物质作用后生成光子形成串扰。另外，光子在进入相机被记录成像前存在逃逸现象，导致光子的产生位置与成像位置出现偏差，严重地影响了快中子成像的空间分辨率。

为了解决粒子串扰的问题，唐世彪等人[81]提出了在中子成像中通过添加铅隔离层来减弱串扰，在一定程度上对抑制串扰、提高图像质量具有积极作用。近年来，一些新型的混合像素探测器被提出应用到快中子成像中，如 Timepix2[82]和 Timepix3[83]等。这类探测器只记录单个粒子的轨迹，并在轨迹的每个点对传感器中的能量损失进行归因，具有像素空间分辨率，可以避免多个轨迹相加为一个，这使其成为利用轨迹过滤来抑制粒子串扰的理想选择。

3.3　噪声污染

在中子照相过程中，成像系统难免会受到各种因素的影响，导致获得的中子图像被大量的噪声污染，降低了图像的分辨率，影响后续的数据处理和分析。中子图像的噪声来源主要有以下几个方面：

1）中子注量率的统计涨落

中子源中的放射性元素具有随机性和微观的量子特性，这导致其产生的中子注量率在时间和空间上呈现出统计涨落，近似遵循高斯-泊松混合分布，这种分布特性在中子图像上引入了高斯-泊松混合型噪声，影响了图像质量。

2）γ 射线污染

在中子源产生中子的过程中，通常会发生一些伴随的核反应，例如(n, α)、(n, β)和(n, γ)等，导致中子束中混入 α、β 及 γ 射线。特别是 γ 射线，由于其穿透能力较强，能够穿透样品并与转换屏上的荧光物质相互作用而发光，最终被 CCD 相机捕获，导致中子图像中出现伽马噪声。此外，一些高能 γ 射线穿透 CCD 相机周围的屏蔽体，撞击 CCD 相机芯片，与其发生相互作用并沉积能量，最终在中子图像上呈现出大量的白斑，即伽马白斑噪声。

3）暗电流影响

由于成像过程中相机需要经历长时间的曝光，会受到自身暗电流的影响，给中子图像带来高斯噪声和电子噪声，降低图像的信噪比，影响中子图像的质量。

为了去除中子图像的噪声，研究学者们陆续提出了一些降噪方法用于中子图像的去噪处理，这些方法可以分为两类：传统方法和深度学习方法[84]。传统方法又可以分为基于滤波器的方法和基于模型的方法，基于滤波器的方法通过设计特定的数学滤波器来去除图像噪声，基于模型的方法通过建立图像和噪声的统计模型来估计和分离图像中的噪声，获得清晰的图像与优化算法。深度学习方法通过训练神经网络来学习从噪声图像到无噪声图像的潜在映射，从而实现图像去噪，已经成为目前的主流方法。

自 21 世纪初至今，一些基于中值滤波、BM3D 算法和 Lucy-Richardson(LR)算法等传统算法的改进方法被应用到中子图像的去噪中[85-89,97,98]，另外，一些基于策略的迭代滤波方法[90,91]被提出，都取得了一定的去噪效果。近几年来，随着深度学习的发展，一些经典的图像去噪网络被应用到中子图像复原，如图 9(a)所示，杨家瑞等人[92]提出了一种基于 U-Net 改进的 DAUNet 网络用于中子图像复原，实现了优异的中子图像去噪和去模糊；如图 9(b)所示，赵辰一等人[93]提出了一种基于对抗生成网络(Generative Adversarial Networks, GAN)改进的去噪网络，在保留图像细节信息的同时很好地消除中子图像中的噪声和模糊；如图 9(c)所示，孟成博等人[94]提出了一种基于 GAN 改进的中子图像多重失真抑制网络，有效地抑制真实中子图像中的多重畸变；如图 9(d)所示，逯兆虎等人[95]提出了一种基于 DnCNN 的多分支去噪网络，对中子图像中的高斯、泊松和伽马白斑噪声分别进行降噪。

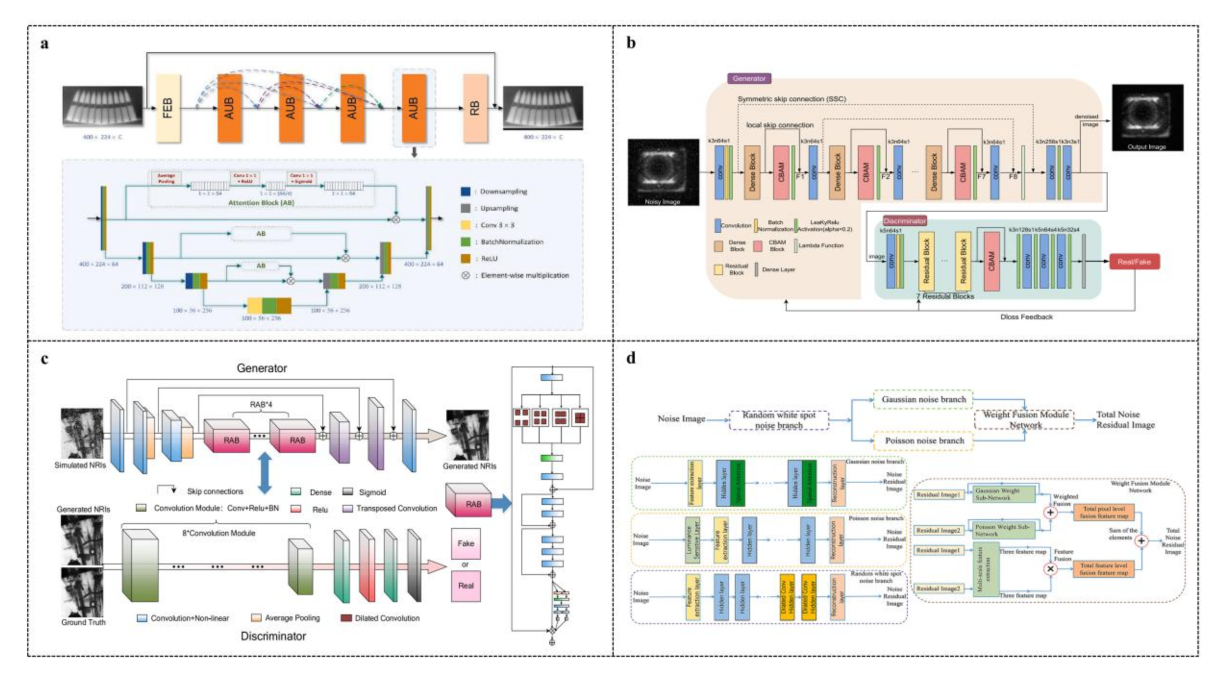


图 9　四种基于深度学习的中子图像去噪方法原理图[92-95]

目前，基于深度学习的中子图像去噪方法都是监督学习方法，需要大量的噪声-干净图像对作为训练数据集，通过训练模型来学习噪声和无噪声图像之间的关系来实现去噪。由于不存在干净的中子图像，现有的方法通过在 X 射线图像或自然图像上添加噪声来生成模拟训练集，但是生成的噪声图像并不能真正反映中子图像的噪声类型。如图 10 所示，我们尝试使用自监督学习方法来解决这一问题，这种方法采用单幅中子图像或几幅中子图像来训练去噪模型，不需要成对的噪声-干净图像，利用噪声图像自身的信息来学习去噪，最终能够有效地完成去噪任务，并且具有较好的泛化能力。

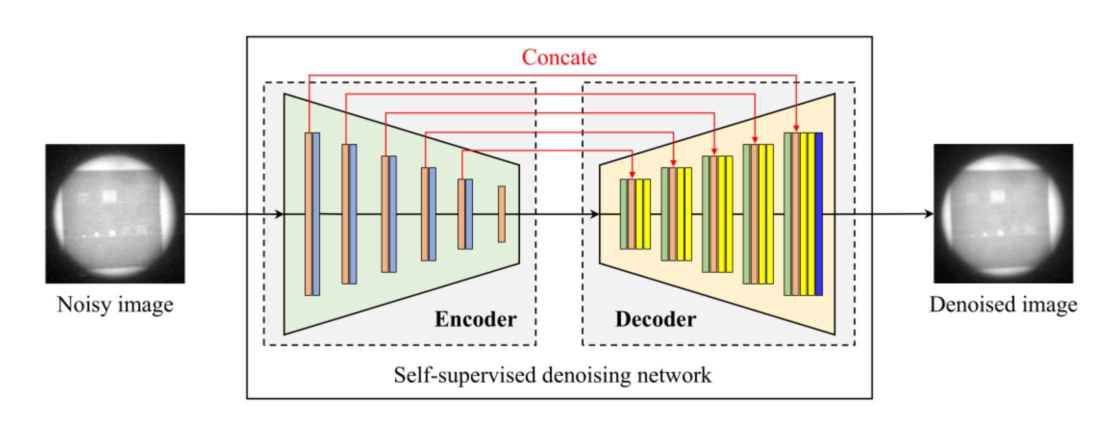


图 10　基于自监督学习的中子图像去噪框架图

综上所述，不同的去噪方法都有各自的优缺点，归纳总结如表 4 所示。从提升去噪效果的角度出发，监督学习方法是中子图像去噪任务的主流方法，未来需要解决建立合适的中子图像数据集的问题，如何获取或设定理想的干净中子图像是首要问题，其次建立准确的中子图像噪声模型是重点。从可用数据少、节省计算成本的角度出发，合适的自监督学习方法是中子图像去噪任务的首要选择，为了提高去噪效果，一是需要选择特定的网络结构和训练策略；二是通过对噪声数据进行变换（如旋转、缩放、裁剪等），生成

更多的训练样本，来增强模型对中子图像噪声的鲁棒性；三是设计新的损失函数，使其能够更好地衡量模型输出与目标噪声之间的差异。

表 4　不同中子图像去噪方法的优缺点

方法		优点	缺点
传统方法	基于滤波器的方法	简单、直观、易于实现	可能会模糊图像的边缘和细节信息；对于复杂噪声的处理能力有限
	基于模型的方法	通常在保持图像细节和纹理方面表现更佳	计算成本较高，模型参数需要精细调整，在处理高强度噪声时效率会大幅降低；由于涉及复杂的迭代优化，通常耗时较长
深度学习方法	监督学习方法	可以提供高质量的去噪效果	需要大量的噪声-干净图像对，这在实际应用中可能难以获取；模型训练和调优过程非常耗时，且对数据多样性和质量的依赖性较强
	自监督学习方法	可以利用单幅噪声图像训练完成去噪	去噪性能受到限制，可能无法达到监督学习方法的性能水平；当噪声分布比较复杂时，去噪效果可能会受限

4　结语与展望

快中子照相的分辨率受到系统关键部件和多种物理因素的影响，国内外学者为了提高快中子照相的分辨率开展了深入的研究，从系统硬件设备的优化设计到成像物理过程的数值校正，做了大量的研究工作，并取得了一定的成效，但是距离高分辨率快中子成像的目标还有一定的差距。基于现有的研究基础，提出一些未来的研究方向和思路如下：

1）提高成像中子束的质量。使用强度更高、准直性更好的中子束流，可以大大提高成像分辨率。散裂中子源或许是未来快中子照相的良好选择，但在小型化、可移动的发展趋势下，紧凑型中子源仍是实际应用的主要选择，在保证中子源足够强度的同时，准直器和屏蔽体的优化设计将是未来的研究方向之一。

2）成像探测器的创新研究。开发新型的成像探测器，例如使用一些新型的闪烁材料或半导体探测器，结合高速读出电子学，在保证一定探测效率的前提下尽可能地提高空间分辨率。另外，通过改进探测器设计，如探测器分组、使用阵列探测器等，来减少粒子串扰给成像质量带来的影响。

3）对中子散射进行适当的消除和校正。一是探讨双探测器法和散射侧像法的可行性，二是针对特定的样品，基于蒙特卡洛模拟方法建立更精准的点散射函数进行数值算法校正。

4）基于深度学习开发新的中子图像去噪算法。首先，需要建立准确的中子图像噪声模型和合适的中子图像数据集，其次，选择合适的网络结构和训练策略，增强算法的鲁棒性和泛化能力。

5）探索新的快中子成像方法。例如伴随粒子成像、多模态成像和单像素成像（“鬼”成像），伴随粒子成像方法通过探测伴随 α 粒子的时间和位置信息来确定出射中子的运动方向和初始时间，结合快中子的探测位置和时间，可以有效区分和消除散射中子的干扰，提高信噪比和成像质量；多模态成像方法通过结

合快中子透射成像和散射成像、诱发裂变成像，或者 X、γ 成像，来提高成像的分辨率和准确性；单像素成像技术将目标束流和参考束流进行空间关联，可以通过提高调制板的分辨率，实现高空间分辨率的图像重建。

参考文献：

[1] PARK J, MUN J, LEE J H, et al. Appl Sci-Basel, 2022, 12(19): 9775. doi: 10.3390/app12199775.

[2] KAM E, REYHANCAN I A, BIYIK R. Nukleonika, 2019, 64(3): 97-101. doi: 10.2478/nuka-2019-0012.

[3] VRBAN B, CERBA S, LULEY J, et al. Eur Phys J Spec Top, 2023, 232(10): 1645-1656. doi: 10.1140/epjs/s11734-023-00887-5.

[4] LU C B, WANG S, WEN G, et al. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(2): 167-172. (in Chinese)
(鲁昌兵, 王宋, 文刚, 等. 含能材料, 2018, 26(2): 167-172. doi: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.02.010.)

[5] MO D W, LIU Y S, JIN G Y, et al. Neutron Radiography[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1996: 1-3. (in Chinese)
(貊大卫, 刘以思, 金光宇, 等. 中子照相[M]. 北京: 原子能出版社, 1996: 1-3.)

[6] FUJINE S, YONEDA K, YOSHII K, et al. Nucl Instrum Meth A, 1999, 424(1): 190-199. doi: 10.1016/s0168-9002(98)01326-6.

[7] LEHMANN E, FREI G, NORDLUND A, et al. IEEE Trans Nucl Sci, 2005, 52(1): 389-393. doi: 10.1109/TNS.2005.843635.

[8] RUSNAK B, HALL J M, FITSOS P, et al. IEEE Particle Accelerator Conference, 2007. doi: 10.1109/PAC.2007.4440657.

[9] CREMER J T, WILLIAMS D L, GARY C K, et al. Nucl Instrum Meth A, 2012, 675: 51-55. doi: 10.1016/j.nima.2012.02.003.

[10] WILLIAMS D L, BROWN C M, TONG D, et al. J Imaging, 2020, 6(12): 128. doi: 10.3390/jimaging6120128.

[11] ANDERSSON P, VALLDOR B J, SUNDEN E A, et al. Nucl Instrum Meth A, 2014, 756(1): 82-93. doi: 10.1016/j.nima.2014.04.052.

[12] DANIELS G C, FRANKLYN C B, DANGENDORF V, et al. Physics Procedia, 2015, 69: 109-114. doi: 10.1016/j.phpro.2015.07.016.

[13] ZBORAY R, ADAMS R, KIS Z. Appl Radiat Isot, 2017, 119: 43-50. doi: 10.1016/j.apradiso.2016.10.012.

[14] BISHNOI S, SARKAR P S, THOMAS R G, et al. J Nondestr Eval, 2019, 38(1). doi: 10.1007/s10921-018-0550-9.

[15] LEE Y, KWAK J G, OH S, et al. Nucl Instrum Meth A, 2019, 944: 162579. doi: 10.1016/j.nima.2019.162579.

[16] PEI Y Y, TANG G Y, GUO Z Y, et al. Nuclear Physics Review, 2005, 22(1): 2. (in Chinese)
(裴宇阳, 唐国有, 郭之虞, 等. 原子核物理评论, 2005, 22(1): 2. doi: 10.3969/j.issn.1007-4627.2005.01.024.)

[17] JIANG S P, CHEN L, CHEN Y, et al. Nuclear Techniques, 2005, 28(2): 151-154. (in Chinese)
(蒋诗平, 陈亮, 陈阳, 等. 核技术, 2005, 28(2): 151-154. doi: 10.3321/j.issn:0253-3219.2005.02.015)

[18] WANG J, LI Y, WANG Y, et al. Nucl Technol, 2019, 205(7): 978-986. doi: 10.1080/00295450.2019.1575122.

[19] WANG J. Research on the Key Technology of Collimating and Imaging for D-T Fast Neutron Raidography[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
(王捷. 氘氚快中子照相系统的准直与成像关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.)

[20] LI Y N, ZHANG Z D, CHEN S Z, et al. IEEE Trans Nucl Sci, 2022, 69(11): 2245-2251. doi: 10.1109/TNS.2022.3189180.

[21] ZHANG F Q, YANG J L, LI Z H, et al. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 6. (in Chinese)
(章法强, 杨建伦, 李正宏, 等. 物理学报, 2007, 56(1): 6. doi: 10.3321/j.issn:1000-3290.2007.01.095.)

[22] TANG B, ZHOU C G, HUO H Y, et al. Sci China Ser G, 2009, 39(8): 1090-1096. (in Chinese)
(唐彬, 周长庚, 霍合勇, 等. 中国科学 G 辑, 2009, 39(8): 1090-1096. doi: 10.1007/s11433-009-0184-0.)

[23] MOU Y F, ZHENG P, WANG X H, et al. Research progress of fast neutron radiography experiment[C]//: The 2nd National Symposium on Nuclear Technology and Application Research, 2009: 727-734. (in Chinese)
(牟云峰, 郑普, 王新华, 等. 快中子照相实验研究进展[C]//: 第二届全国核技术及应用研究学术研讨会, 2009: 727-734.)

[24] WANG S, YIN W, LIU B, et al. Appl Radiat Isot, 2021, 169: 109564. doi: 10.1016/j.apradiso.2020.109564.

[25] LI J J, YU B, XU T, et al. Nucl Instrum Meth A, 2022, 1044: 167449. doi: 10.1016/j.nima.2022.167449.

[26] ZHENG X H, NIE Y B, RUAN X C, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(6): 5. (in Chinese)
(郑小海, 聂阳波, 阮锡超, 等. 原子能科学技术, 2015, 49(6): 5. doi: 10.7538/yzk.2015.49.06.1117.)

[27] LU C B, XU P, BAO J, et al. Acta Physica Sinica, 2015, 64(19): 1-7. (in Chinese)
(鲁昌兵, 许鹏, 鲍杰, 等. 物理学报, 2015, 64(19): 1-7. doi: 10.7498/aps.64.198702.)

[28] LU C B, BAO J, HUANG Y, et al. Nucl Sci Tech, 2017, 28(6): 115-122. doi: 10.1007/s41365-017-0228-5.

[29] LIU J T. Studies of Fast Neutron Radiography with the Cockcroft-Walton Accelerator Abstract[D]. Hengyang: University of

South China, 2013: 20. (in Chinese)
(刘剑韬. 基于高压倍加器快中子成像技术研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2013: 20.)
[30] HUSSEIN E M A. Handbook on Radiation Probing, Gauging and Imaging, Volume II: Applications and Design[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003: 443-769. doi: 10.1007/0-306-48403-X.
[31] MARKGRAF J F W. Collimators for thermal neutron radiography: An overview[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1987.
[32] RILEY K J, BINNS P J, ALI S J, et al. Phys Med Biol, 2004, 49(10): 2015. doi: 10.1088/0031-9155/49/10/012.
[33] ROSA R, ANDREOLI F, MATTONI M, et al. Nucl Instrum Meth A, 2009, 605(1-2): 57-61. doi: 10.1016/j.nima.2009.01.169.
[34] FANTIDIS J G, NICOLAOU G E, TSAGAS N F. Nucl Instrum Meth A, 2010, 618(1-3): 331-335. doi: 10.1016/j.nima.2010.02.107.
[35] FANTIDIS J G, NICOLAOU G E, TSAGAS N F. J Radioanal Nucl Chem, 2010, 284(2): 479-484. doi: 10.1007/s10967-010-0502-z.
[36] BERGAOUI K, REGUIGUI N, GARY C, et al. J Radioanal Nucl Chem, 2014, 299: 41-51. doi: 10.1007/s10967-013-2729-y.
[37] FANTIDIS J G. J Taibah Univ Sci, 2017, 11(6):1214-1220. doi: 10.1016/j.jtusci.2016.10.002.
[38] LU W H, GUO H P, LU Y J. Nucl Sci Tech, 2018, 29(08): 101-109. doi: 10.1007/s41365-018-0455-4.
[39] YAN M F, HU G, LIU B, et al. J Instrum, 2020, 15(12): P12002. doi: 10.1088/1748-0221/15/12/P12002.
[40] MIKEROV V, SAMOSYUK V, VERUSHKIN S. Nucl Instrum Meth A, 2005, 542(1-3): 192-196. doi: 10.1016/j.nima.2005.01.099.
[41] ZHANG F Q, QI J M, ZHANG J H, et al. Acta Physica Sinica, 2014, 63(12):128701. (in Chinese)
(章法强, 祁建敏, 张建华, 等. 物理学报, 2014, 63(12):128701. doi: 10.7498/aps.63.128701.)
[42] BOGOLUBOV E, BUGAENKO O, KUZIN S, et al. Nucl Instrum Meth A, 2005, 542(1/3): 187-191. doi: 10.1016/j.nima.2005.01.098.
[43] LI H, ZOU Y, WANG S, et al. Physics Procedia 2013, 43: 66-72. doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.008.
[44] DANGENDORF V, LACZKO G, REGINATTO M, et al. Nucl Instrum Meth A, 2005, 542: 197-205. doi: 10.1016/j.nima.2005.01.100.
[45] OHSHITA H, UNO S, OTOMO T, et al. Nucl Instrum Meth A, 2010, 623(1): 126-128. doi: 10.1016/j.nima.2010.02.170.
[46] CORTESI M, ZBORAY R, ADAMS R, et al. J Instrum, 2012, 7(2): C02056. doi:10.1088/1748-0221/7/02/C02056.
[47] WEI Y D, ZHOU J R, ZHOU X J, et al. Nuclear Techniques, 2021, 44(2): 020402. (in Chinese)
(魏阳东, 周健荣, 周晓娟, 等. 核技术, 2021, 44(2): 020402. doi: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.020402.)
[48] AMBROSI R M, FRASER G W, FELLER B, et al. Nucl Instrum Meth A, 2003, 500(1-3): 351-361. doi: 10.1016/S0168-9002(03)00297-3.
[49] AMBROSI R M, FRASER G W, STREET R A, et al. Nucl Instrum Meth A, 2005, 542(1-3): 271-278. doi: 10.1016/j.nima.2005.01.147.
[50] RAN J L, LU X L, MA Z W, et al. Nuclear Techniques, 2015, 38(9): 090401. (in Chinese)
(冉建玲, 卢小龙, 马占文, 等. 核技术, 2015, 38(9): 090401. doi: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.090401.)
[51] MA Z W, LI W M, RAN J L, et al. J Instrum, 2018, 13(5): P05034. doi: 10.1088/1748-0221/13/05/P05034.
[52] HU Z M, LIU C Q, MA Z W, et al. Nuclear Techniques, 2022, 45(2): 020201. (in Chinese)
(户志鸣, 刘昌奇, 马占文, 等. 核技术, 2022, 45(2): 020201. doi: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.020201.)
[53] MA Z W, BAI X H, LIU C Q, et al. J Instrum, 2023, 18(8): T08004. doi: 10.1088/1748-0221/18/08/T08004.
[54] CHUIRAZZI W C, IBRAHIM O, PRANEETH K, et al. J Radioanal Nucl Chem, 2018, 318: 543-551. doi: 10.1007/s10967-018-6080-1.
[55] MCCALL K M, SAKHATSKYI K, LEHMANN E H, et al. ACS Nano, 2020, 14(11): 686-697. doi: 10.1021/acsnano.0c06381.
[56] MORAD V, MCCALL K M, SAKHATSKYI K, et al. ACS Photonics, 2021, 8(11): 3357-3364. doi: 10.1021/acsphotonics.1c01348.
[57] ZHENG J, ZENG Y, WANG J, et al. J Amer Chem Soc, 2021, 143(50): 21302-21311. doi: 10.1021/jacs.1c08923.
[58] GAO, Y, WAN, P, JIN, T, et al. Small, 2023, 19(40): 2301530. doi: 10.1002/smll.202301530.

[59] SHAO W Y, LI Q, He T Y, et al. Adv Funct Mater, 2023, 33(40): 2301767. doi: 10.1002/adfm.202301767.
[60] HFLICH N, POOTH O. Nucl Instrum Meth A, 2022, 1040: 167211. doi: 10.1016/j.nima.2022.167211.
[61] DECKER A W, CHEREPY N J, HOK S, et al. IEEE Trans Nucl Sci, 2023, 70(1): 28-36. doi: 10.1109/TNS.2022.3228157.
[62] TANG B. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(4): 387-390. (in Chinese)
(唐彬. 核电子学与探测技术, 2004, 24(4): 387-390. doi: 10.3969/j.issn.0258-0934.2004.04.017.)
[63] CHEN L, JIANG S P, WAN L B, et al. Nuclear Physics Review, 2006, 23(3): 310-314. (in Chinese)
(陈亮, 蒋诗平, 万里飏, 等. 原子核物理评论, 2006, 23(3): 310-314. doi: 10.3969/j.issn.1007-4627.2006.03.010.)
[64] MANDOUR M, SHAAT M, BADAWI A, et al. Nucl Instrum Meth A, 2006, 568(2): 810-815. doi: 10.1016/j.nima.2006.07.065.
[65] TREMSIN A S, KARDJILOV N, DAWSON M, et al. Nucl Instrum Meth A, 2011, 651: 145-148. doi: 10.1016/j.nima.2011.01.066.
[66] CARMINATI C, BOILLAT P, SCHMID F, et al. PLoS ONE, 2019, 14(1): e0210300. doi: 10.1371/journal.pone.0210300.
[67] CARMINATI C, BOILLAT P, LAEMMLEIN S, et al. Mater Res Proc, 2020, 15: 174-179. doi: 10.21741/9781644900574-27.
[68] YOU S C, HE L F, WU M M, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(10): 2198-2204. (in Chinese)
(游绍初, 贺林峰, 武梅梅, 等. 原子能科学技术, 2024, 58(10): 2198-2204. doi: 10.7538/yzk.2023.youxian.0863.)
[69] ABDELRAHMAN M S. Scattering correction and image restoration in neutron radiography and computed tomography[D]. USA: The University of Texas at Austin, 2000.
[70] YOSHIIA K, KOBAYASHI H. Nucl Instrum Meth A, 1996, 377(1): 76-79. doi: 10.1016/0168-9002(96)00119-2.
[71] DOU H F, TANG B. Chin Phys C, 2011, 35(5): 483-487. doi: 10.1088/1674-1137/35/5/016.
[72] ZHANG F Q, YANG J L, LI Z H, et al. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 3578-3583. (in Chinese)
(章法强, 杨建伦, 李正宏, 等. 物理学报, 2007, 56(6): 3578-3583. doi: 10.3321/j.issn:1000-3290.2007.06.089.)
[73] HASSANEIN R, LEHMANN E, VONTOBEL P. Nucl Instrum Meth A, 2005, 542(1/3): 353-360. doi: 10.1016/j.nima.2005.01.161.
[74] KARDJILOV N, BEER F D, HASSANEIN R, et al. Nucl Instrum Meth A, 2005, 542: 336-341. doi: 10.1016/j.nima.2005.01.159.
[75] HASSAN M H. Nucl Instrum Meth B, 2009, 267(15): 2545-2549. doi: 10.1016/j.nimb.2009.05.062.
[76] SEGAL Y, GUTMAN A, FISHMAN A, et al. Nucl Instrum Meth A, 1982, 197(2-3): 557-562. doi: 10.1016/0167-5087(82)90353-2.
[77] HASSANEIN R, BEER F D, KARDJILOV N, et al. Physica B, 2006, 385(Part2): 1194-1196. doi: 10.1016/j.physb.2006.05.406.
[78] LIU S Q, THOMAS B, LI H, et al. Chinese Phys C, 2013, 37(11): 118201. doi:10.1088/1674-1137/37/11/118201.
[79] LIU S Q, THOMAS B, ZOU Y B, et al. Sci China Phys Mech Astron, 2014, 57(2): 244-250. doi: 10.1007/s11433-013-5362-4.
[80] QIN J, NI J Y, YE L F, et al. Nucl Sci and Tech, 2022, 33(9): 1-9. doi: 10.1007/s41365-022-01094-y.
[81] TANG S B, MA Q L, YIN Z J. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(2): 206-209. (in Chinese)
(唐世彪, 马庆力, 阴泽杰. 核电子学与探测技术, 2015, 35(2): 206-209. doi: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.02.022.)
[82] ANDREA S, MARKO F, ANDREJ N, et al. Nukleonika, 2024, 69(2): 135-140. doi: 10.2478/nuka-2024-0020.
[83] GRANJA C, UHLAR R, CHUPRAKOV I, et al. J Instrum, 2023, 18(01): P01003. doi: 10.1088/1748-0221/18/01/P01003.
[84] YANG J R. Research on Neutron Image Restoration Based on Deep Learning[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2023. (in Chinese)
(杨家瑞. 基于深度学习的中子图像复原方法研究[D]. 长春：东北师范大学, 2023.)
[85] LI H Y, BURKHARD S, ELBIO C, et al. Nucl Instrum Meth A, 2006, 564(1): 405-413. doi: 10.1016/j.nima.2006.04.063.
[86] QIAO S, ZHAO W J, SUN J N. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(6): 1143-1146. (in Chinese)
(乔双, 赵韦静, 孙佳宁. 原子能科学技术, 2016, 50(6): 1143-1146. doi: 10.7538/yzk.2016.50.06.1142.)
[87] QIAO S, WU X Y, ZHAO C Y, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(4): 730-736. (in Chinese)
(乔双, 吴晓阳, 赵辰一, 等. 原子能科学技术, 2018, 52(4): 730-736. doi: 10.7538/yzk.2017.youxian.0457.)
[88] QIAO S, WANG Q, SUN J N, et al. Nucl Instrum Meth A, 2014, 735: 541-545. doi: 10.1016/j.nima.2013.10.001.

[89] QIAO S, WANG Q, SUN J N. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(4): 766-768. (in Chinese)
(乔双，王巧，孙佳宁. 原子能科学技术, 2015, 49(4): 766-768. doi: 10.7538/yzk.2015.49.04.0765.)

[90] ZHAO C Y, YAN Y, LI H Y, et al. Fusion Eng Des, 2019, 150: 111375. doi: 10.1016/j.fusengdes.2019.111375.

[91] ZHAO C Y, YAN Y, WANG Y M, et al. Fusion Eng Des, 2020, 156: 111739. doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111739.

[92] YANG J R, ZHAO C Y, QIAO S, et al. Ann Nucl Energy, 2023, 188: 109820. doi: 10.1016/j.anucene.2023.109820.

[93] ZHAO C Y, YIN W Q, ZHANG T, et al. Nucl Instrum Meth A, 2023, 1055: 168505. doi: 10.1016/j.nima.2023.168505.

[94] MENG C B, ZHU W W, ZHANG Z, et al. Nucl Sci and Tech, 2024, 35: 81. doi: 10.1007/s41365-024-01445-x.

[95] LU Z H, LI G H, JIA S L, et al. Nucl Instrum Meth B, 2024, 553: 165402. doi: 10.1016/j.nimb.2024.165402.

[96] LU C B, XU P, BAO J, et al. Nuclear Techniques, 2015, 38(8): 080202. (in Chinese)
(鲁昌兵，许鹏，鲍杰，等. 核技术, 2015, 38(8): 080202. doi: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080202.)

[97] YU W T, XU P, BAO J, et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2023, 43(2): 369-375. (in Chinese)
(俞汪涛，许鹏，鲍杰，等. 核电子学与探测技术, 2023, 43(2): 369-375. doi: 10.3969/j.issn.0258-0934.2023.02.025.)

[98] YU W T, XU P, BAO J, et al. AIP Advances, 2024, 14(1): 015205. doi:10.1063/5.0181026.

The Influencing Factor and Related Research Progress of Resolution in Fast Neutron Radiography

XU Peng[1], YU Wangtao[1], BAO Jie[2], HOU Linjun[1], ZHOU Man[1]

(1. College of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Fast neutron radiography technology has a unique application potential in the field of non-destructive testing. It can identify and detect defects inside large-sized samples, which effectively complements the limitations of traditional low-energy neutron radiography and X-ray radiography. However, the problem of low resolution of fast neutron radiography limits its application in high-precision detection. In this paper, the basic principle and system composition of fast neutron radiography are briefly introduced, and the multiple factors affecting the resolution of fast neutron radiography are deeply analyzed. Starting from the two dimensions of system composition and imaging process, the related research work carried out by scholars at home and abroad is systematically reviewed. Finally, based on the existing research basis, some research directions and ideas are provided to improve the resolution of fast neutron radiography.

Key words: non-destructive testing; fast neutron radiography; resolution; system composition; imaging process

Received date: 03 Dec. 2024; **Revised date:** 17 Jan. 2025

1) E-mail: xupeng76345@163.com